

錨碇式鋼板樁碼頭設計例(地震時砂質地盤)

設計時應對平時及地震時分別檢討，取安全者。本文以地震時為例說明。設計流程參照[繫船設施設計流程](#)。

1) 設計條件

- ① 堤址水深:-8m
- ② 上載重 $W_{\text{上載重}}$: 32kN/m²
- ③ 高水位 HWL: +1.5m
- ④ 低水位 LWL: +0.0m
- ⑤ 殘留水位 RWL: +1.0m
- ⑥ 混凝土與砂礫間的摩擦係數 μ : 0.6
- ⑦ 地震時壁面摩擦角 δ : 10°
- ⑧ 背填材為一般土砂，其單位體積重量 γ 及內部摩擦角 ϕ
 - Ⓐ 高潮位以上 $\gamma_1 = 18\text{kN/m}^3$, $\phi_1 = 35^\circ$
 - Ⓑ 高潮位至殘留水位間 $\gamma_2 = 20\text{kN/m}^3$, $\phi_2 = 25^\circ$
 - Ⓒ 殘留水位以下 $\gamma_3 = 10\text{kN/m}^3$, $\phi_3 = 25^\circ$
- ⑨ $h_{\text{堤頂高}}$: +3.0m
- ⑩ $h_{\text{堤底高}}$: -8.0m
- ⑪ 震度: 地震最大水平加速度為 100cm/sec²，即震度 $k=100/980 \doteq 0.1$

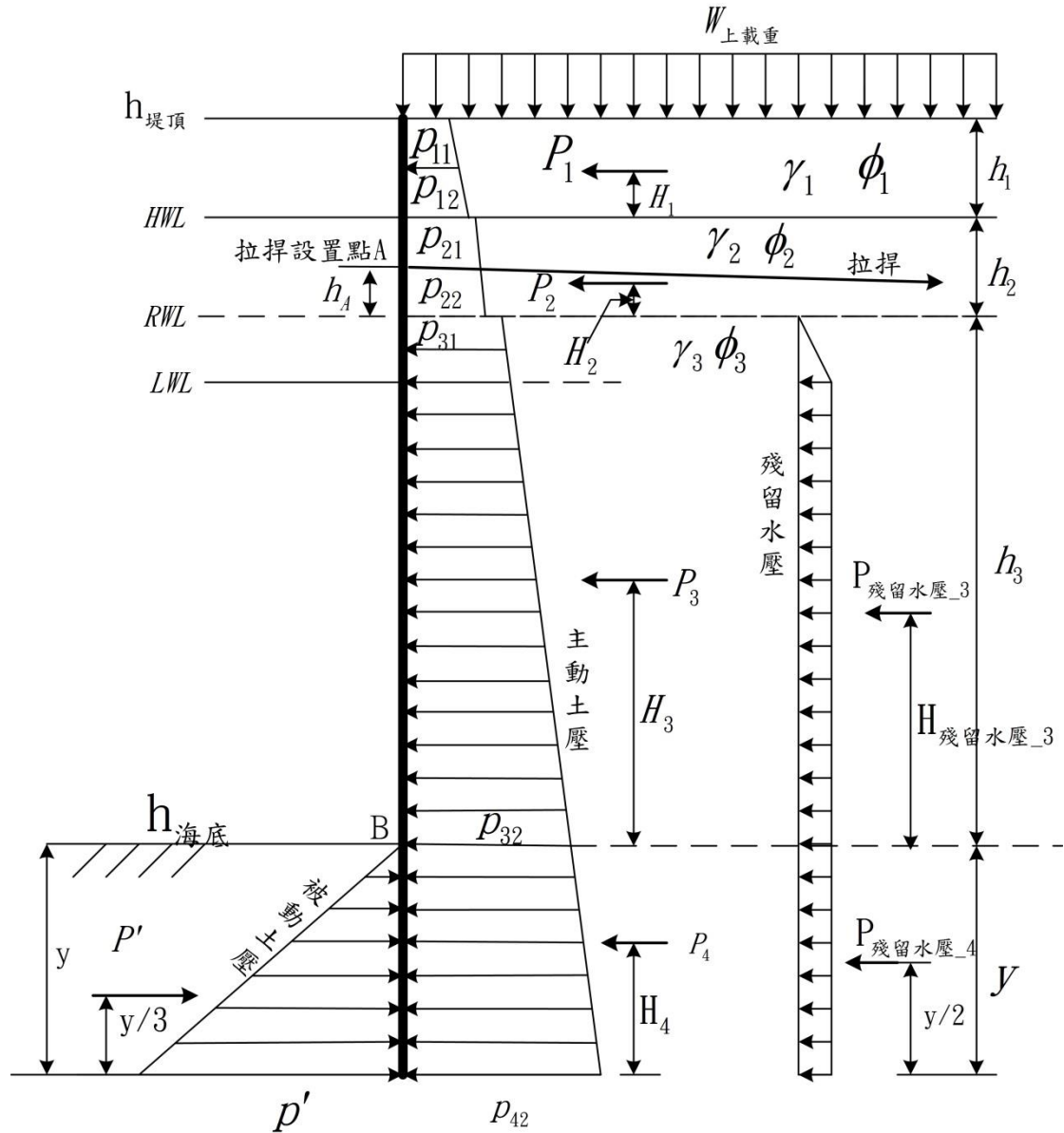
2) 決定拉桿材設置位置

考量施工便利性，原則上設置於殘留水位上方，以減少水中施工困難度，本例以殘留水位上方 A 處作為拉桿材設置位置，A 與殘留水位間的高度為 H_A ，一般取 $2/3(\text{HWL}-\text{LWL})$ 。

3) 決定板樁貫入深度

地震時，作用於板樁外力為主、被動土壓、殘留水壓、上載重及拉桿張力作用。

本例假定地盤為砂質土，主、被動土壓受如下圖所示為計算方便，將最下層土層分成海底上及海底下2部份。



背填主動土壓壁面摩擦角為 $\delta=10^\circ$ ，被動土壓可視 $\delta=0^\circ$ (屬安全側)。首先假定貫入深度為 y 公尺，依「背填土壓」計算下圖所示被動土壓 p' 、合力 P' 、各土層主動土壓 p_{ni} ($i = 1, 2, n = 1 \sim 4$) 及各土層土壓合力 P_n ($n=1 \sim 4$) 及其作用點

H_n ($n=1 \sim 4$)。

若背填土為黏土時，如圖所示，主被動土壓作用，計算方法參照「背填土壓」。
設計板樁貫入深度應分成平時及地震時計算，必須依下式滿足安全率 F。

$$M_t - FM_s = 0 \quad (1)$$

M_t : 對拉桿材設置點被動土壓引起力矩(kNm/m)

M_s : 對拉桿材設置點主動土壓引起力矩(kNm/m)

$$M_t = P \left(h' + \frac{2}{3} y \right)$$

$$M_s = P_1(h_2 - h_A + H_1) - P_2(h_A - H_2) - P_3(h' - H_3) - P_4(h' + y - H_4)$$

$$-P_{\text{殘留水壓}_3}(h' - H_{\text{殘留水壓}_3}) - P_{\text{殘留水壓}_4} \left(h' + \frac{1}{2} y \right)$$

$$h' = h_3 + h_A$$

$$P_1 = \frac{p_{11} + p_{12}}{2} h_1$$

$$H_1 = \frac{2p_{11} + p_{12}}{3(p_{11} + p_{12})} h_1$$

$$P_2 = \frac{p_{21} + p_{22}}{2} h_2$$

$$H_2 = \frac{2p_{21} + p_{22}}{3(p_{21} + p_{22})} h_2$$

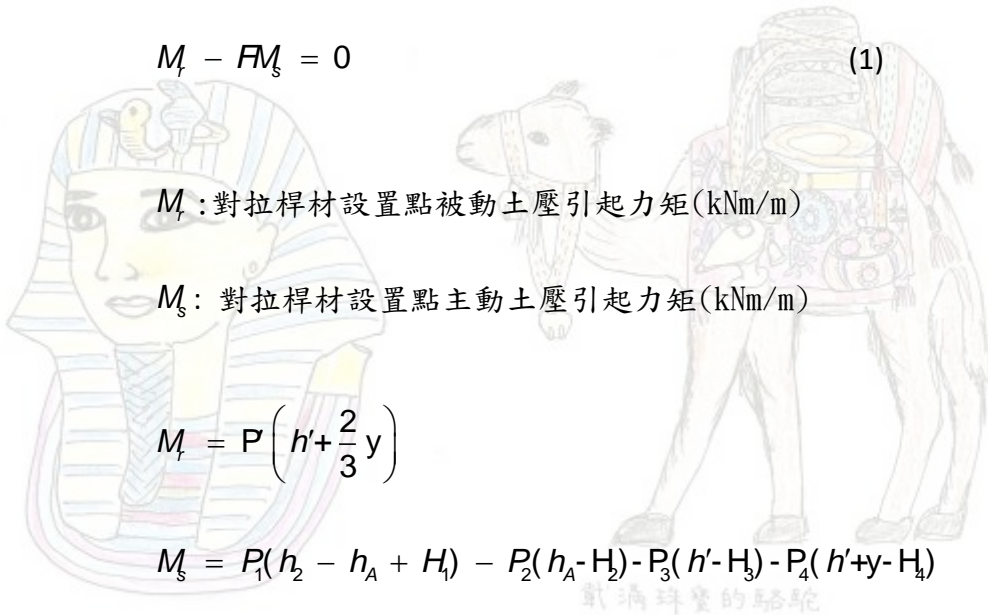
$$P_3 = \frac{p_{31} + p_{32}}{2} h_3$$

$$H_3 = \frac{2p_{31} + p_{32}}{3(p_{31} + p_{32})} h_3$$

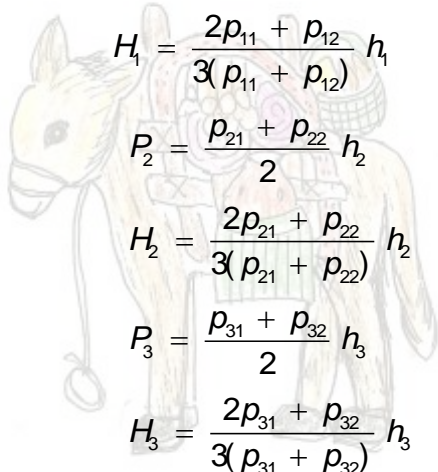
$$P_4 = \frac{p_{32} + p_{42}}{2} y$$

$$H_4 = \frac{2p_{32} + p_{42}}{3(p_{32} + p_{42})} y$$

$$P = \frac{1}{2} p'y$$



載滿珠寶的駱駝



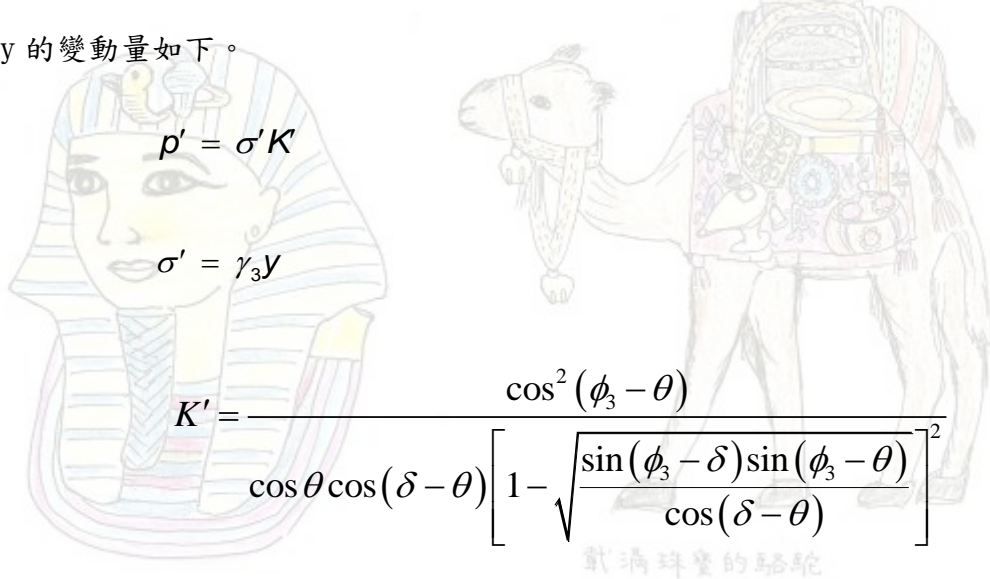
載滿寶品



阿拉丁神燈

p_{11} 、 p_{12} 、 p_{21} 、 p_{22} 、 p_{31} 、 p_{32} 、 h_1 、 h_2 及 h_3 為依「背填土壓」求得已知值。 $P_{\text{殘留水壓}_3}$

及 $H_{\text{殘留水壓}_3}$ 依「殘留水壓」求得已知值。 p' 、 p_{42} 、 $P_{\text{殘留水壓}_4}$ 及 H_4 為包含貫入深度 y 的變動量如下。



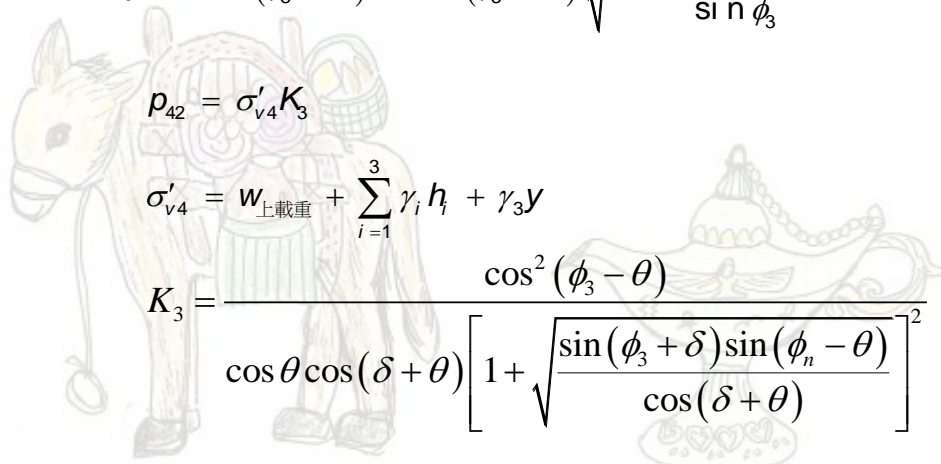
$$p' = \sigma' K'$$

$$\sigma' = \gamma_3 y$$

$$K' = \frac{\cos^2(\phi_3 - \theta)}{\cos \theta \cos(\delta - \theta) \left[1 - \sqrt{\frac{\sin(\phi_3 - \delta) \sin(\phi_3 - \theta)}{\cos(\delta - \theta)}} \right]^2}$$

$$\cot \zeta' = -\tan(\phi_3 - \delta) + \sec(\phi_3 - \delta) \sqrt{\frac{\cos(\varphi + \delta - \theta) \sin(\phi_3 - \delta)}{\cos(\varphi - \delta) \sin(\phi_3 - \theta)}}$$

$$\cot \zeta' = \tan(\phi_3 - \delta) + \sec(\phi_3 - \delta) \sqrt{\frac{\cos \delta \sin(\phi_3 - \delta)}{\sin \phi_3}}$$



$$p_{42} = \sigma'_{v4} K_3$$

$$\sigma'_{v4} = w_{\text{上載重}} + \sum_{i=1}^3 \gamma_i h_i + \gamma_3 y$$

$$K_3 = \frac{\cos^2(\phi_3 - \theta)}{\cos \theta \cos(\delta + \theta) \left[1 + \sqrt{\frac{\sin(\phi_3 + \delta) \sin(\phi_3 - \theta)}{\cos(\delta + \theta)}} \right]^2}$$

$$\cot \zeta_3 = \tan(\phi_3 + \delta) + \sec(\phi_3 + \delta) \sqrt{\frac{\cos(\delta + \theta) \sin(\phi_3 + \delta)}{\cos(-\delta) \sin(\phi_3 - \theta)}}$$

$$P_{\text{殘留水壓}_3} = \frac{1}{2} \gamma_w \Delta h_w^2 + \gamma_w \Delta h_w (h_3 - \Delta h_w) = \gamma_w \Delta h_w (h_3 - \frac{1}{2} \Delta h_w)$$

$$H_{\text{殘留水壓}_3} = \frac{\frac{1}{2} \gamma_w \Delta h_w^2 \left(h_3 - \frac{2}{3} \Delta h_w \right) + \frac{1}{2} \gamma_w \Delta h_w (h_3 - \Delta h_w)^2}{P_{\text{殘留水壓}_3}}$$

$$P_{\text{殘留水壓}_4} = \gamma_w \Delta h_w y$$

$$\Delta h_w = RWL - LWL$$

$$P \left(h' + \frac{2}{3} y \right) = a_1 y^3 + b_1 y^2$$

$$P_4 (h' + y - H_4) = a_2 y^3 + (b_2 + b_3) y^2 + (c_1 + c_2) y$$

$$P_{\text{殘留水壓}_4} \left(h' + \frac{1}{2} y \right) = b_4 y^2 + c_3 y$$

$$a = a_1 - Fa_2$$

$$a_1 = \frac{1}{3} \gamma_3 K'$$

$$a_2 = \gamma_3 K_3$$

$$b = b_1 - F(b_2 + b_3 + b_4)$$

$$b_1 = \frac{1}{2} \gamma_3 h' K'$$

$$b_2 = 2\gamma_3 (h' - H_4) K_3$$

$$b_3 = \frac{\rho_{32}}{2}$$

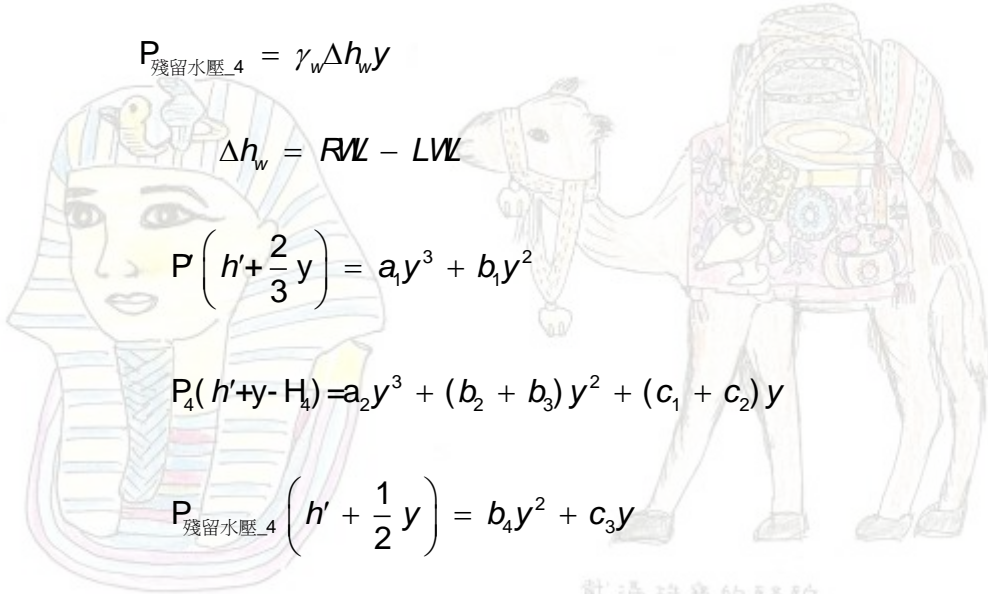
$$b_4 = \frac{1}{2} \gamma_w \Delta h_w$$

$$c = -F(c_1 + c_2 + c_3)$$

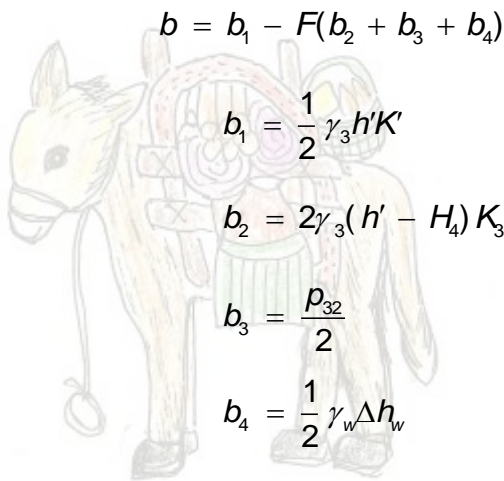
$$c_1 = \left(w_{\text{上載重}} + \sum_{i=1}^3 \gamma_i h_i \right) K_3$$

$$c_2 = \frac{\rho_{32}}{2} (h' - H_4)$$

$$c_3 = \gamma_w \Delta h_w h'$$



載滿珠寶的駱駝



載滿貨品的驢子



阿拉丁神燈

$$d = -F(d_1 - d_2 - d_3 - d_4)$$

$$d_1 = P_1(h_2 - h_A + H_1)$$

$$d_2 = P_2(h_A - H_2)$$

$$d_3 = P_3(h' - H_3)$$

$$d_4 = P_{\text{殘留水壓}_3}(h' - H_{\text{殘留水壓}_3})$$

將上述各式代入(1)式得

$$ay^3 + by^2 + cy + d = 0 \quad (2)$$

載滿珠寶的駱駝

解(2)式可得貫入深度 y 如下式。

$$y = -\frac{b}{3a} + \sqrt[3]{e + \sqrt{e^2 + \left(\frac{c}{3a} - \frac{b^2}{9a^2}\right)^3}}$$

$$e = \frac{bc}{6a^2} - \frac{b^3}{27a^3} - \frac{d}{2a}$$

4) 作用於鋼板樁最大彎矩及鋼板樁斷面

假定拉桿設置位置 A 點及海底 B 點為海底 B 點的支點，對海底 B 點取各作用力力矩，得拉桿設置位置 A 點反作用力 R_A 如下

$$R_A = \left[\begin{aligned} &P_1(H_1 + h_2 + h_3) + P_2(H_2 + h_3) + P_3H_3 \\ &+ P_{\text{殘留水壓}_3}H_{\text{殘留水壓}_3} - P_4(y - H_4) - \frac{1}{2}P_{\text{殘留水壓}_4}y \end{aligned} \right] / h'$$

$$R_B = P_1 + P_2 + P_3 + P_4 + P_{\text{殘留水壓}_3} + P_{\text{殘留水壓}_4} - R_A$$

反作用力 R_A 為碼頭法線方向每 1 公尺長的值

土層為單層或雙層時參考「作用於鋼板樁最大彎矩」。如圖所示 3 層砂土層，以樁材設置位置點為原點，作用於鋼板樁任意 1 點 z 的力矩為

$$M_z = R_A z - P_1(H_1 + z) - P_2(H_2 + z) - p_{31} \frac{z^2}{2} - \frac{p_{32} - p_{31}}{h_3} \frac{z^3}{6}$$

將上式對 z 微分，並令其等於 0，得

$$az^2 + bz + c = 0$$

$$a = \frac{p_{32} - p_{31}}{2h_3}$$

$$b = p_{31}$$

$$c = P_1 + P_2 - R_A$$

即最大力矩 M_{\max} 發生在

$$z = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}$$

將 z 正值代入 M_z 得最大彎矩 M_{\max} ，鋼板樁容許應力為 σ_a 時，採用鋼板樁的斷面係數 Z 必須滿足下式

$$Z > M_{\max} / \sigma_a$$

5) 拉桿張力及拉桿材斷面

拉桿設置間隔為 l 公尺時，每根拉桿的張力(kN) T 為

$$T = R_A l \sec \theta \quad (\text{kN})$$

θ 為拉桿與水平呈角度($^\circ$)，通常可視 $\sec \theta \approx 1$ 。

鋼板樁上部工會設置繫船柱繫船時，會增加拉桿張力，必要加以檢討。通常作用於繫船柱牽引水平分力 P ，假定平均分擔至 4 根拉桿時，拉桿張力可依下

式計算

$$T = \left(R_A \ell + \frac{P}{4} \right) \sec \theta$$

拉桿材容許拉張應力為 σ_a 時，拉桿必要直徑 d 可依下式計算

$$d = \sqrt{\frac{4T10^3}{\pi\sigma_a}} \quad (\text{cm})$$

拉桿直徑 d 應加上餘裕防蝕量，例如使用年限 30 年，每年腐蝕 0.03mm，則

$$d = d + 2 \times 0.003 \times 30$$

使用 U 或 Z 形鋼板樁時以 4 片為 1 組。

6) 腰樑斷面

腰樑視為以拉桿設置點為支承的連續樑，受最大彎矩 M_u ，可以下式近似表示。

$$M_u = T \ell / 10$$

腰樑斷面可依下式計算

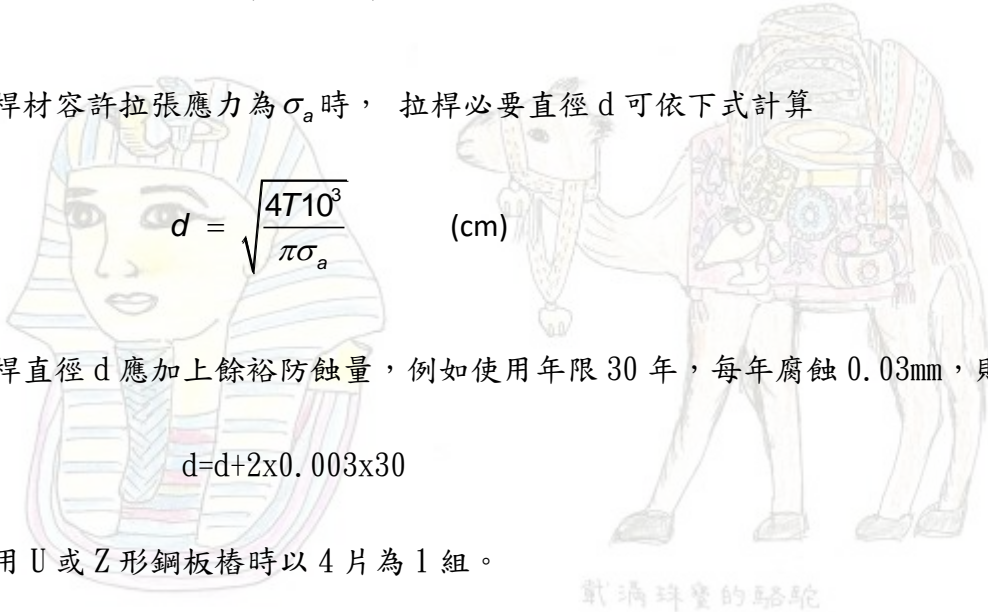
$$Z > M_u / \sigma_a$$

Z ：鋼板樁斷面係數 (cm^3/m)

σ_a ：鋼板樁容許應力 (N/cm^2)

T ：每根拉桿的張力 (kN)

ℓ ：拉桿材間距 (U 形鋼板樁時，通常間隔 4 片)

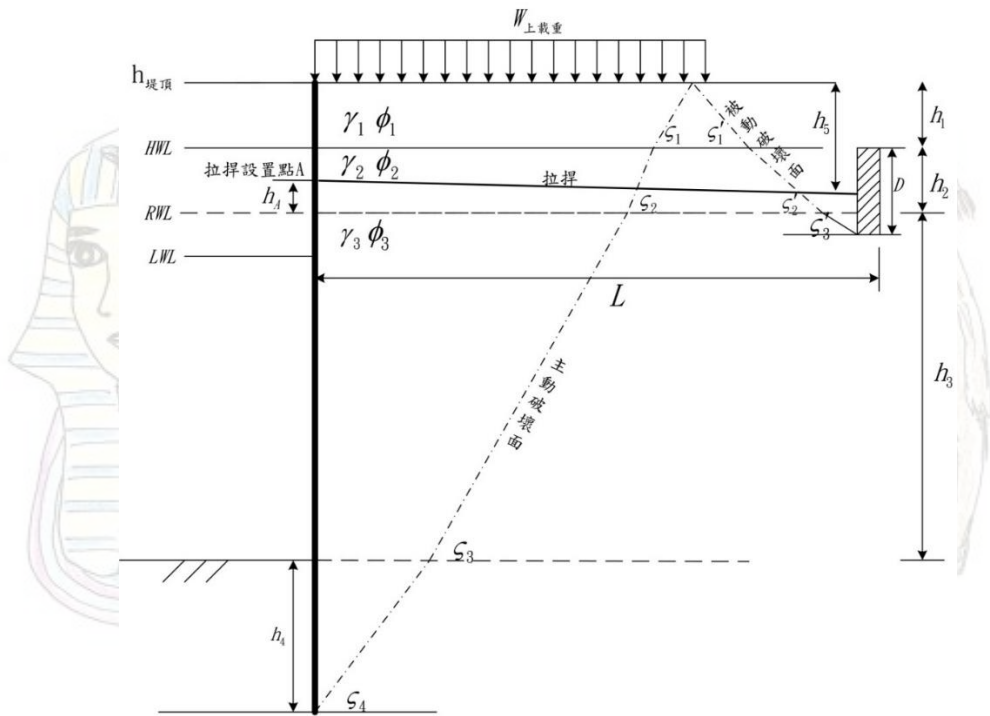


載滿珠寶的駱駝



載滿珠寶的駱駝

6) 錨碇工斷面及設置位置



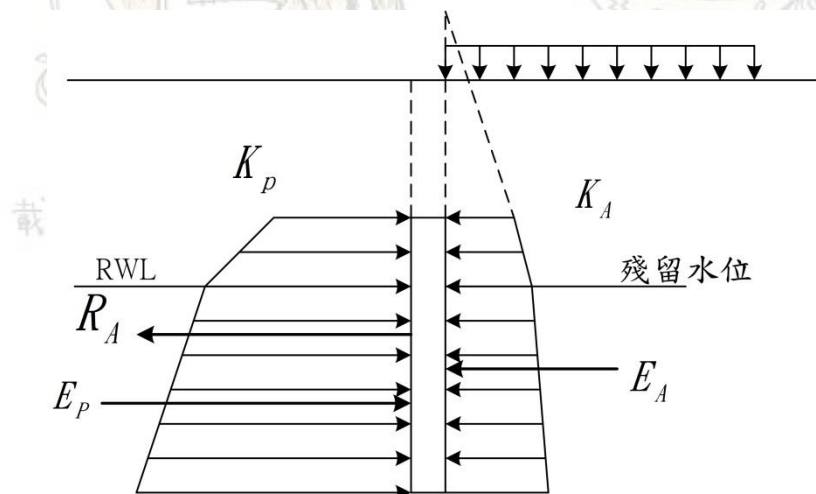
① 錨碇版高

2011 埃及尼羅河之旅

錨碇版中心距地表面下 h_5 處，板高 η ，如下圖，依「土壓」計算作用於錨碇版的主被動土壓，但是被動土壓不必考量上載重，地震時的水中比震度 k' 如下所述。

錨碇版高度 D 及埋設深度 h_5 必須滿足下式 (F 為安全率)

$$F = \frac{E_p}{R_A + E_A}$$



② 錨碇板設置位置

地震時主動破壞面與水平面間角度 ζ_n ($n=1\sim 4$)，參考「背填土壓」依下式計算

$$\cot \zeta_n = -\tan(\phi_n + \delta + \varphi) + \sec(\phi_n + \delta + \varphi) \sqrt{\frac{\cos(\varphi + \delta + \theta_n) \sin(\phi_n + \delta)}{\cos(\varphi - \delta) \sin(\phi_n - \theta_n)}} \quad (n=1\sim 4)$$

地震時被動破壞面與水平面間角度 ζ'_n ($n=1\sim 3$)依下式計算

$$\cot \zeta'_n = \tan(\phi_n - \delta - \varphi) + \sec(\phi_n - \delta - \varphi) \sqrt{\frac{\cos(\varphi + \delta - \theta'_n) \sin(\phi_n - \delta)}{\cos(\varphi - \delta) \sin(\phi_n - \theta'_n)}} \quad (n=1\sim 3)$$

水面上地盤： $\theta = \tan^{-1}k$ (°)

水面下地盤： $\theta = \tan^{-1}k'$

2011 埃及尼羅河之旅

$$k' = \frac{(\sum \gamma h) + \gamma_w h_w + w}{(\sum \gamma h) + w} k$$

錨碇板設置位置 L 可依下式計算

$$L \geq h_4 \cot \zeta_4 + h_3 \cot \zeta_3 + h_2 \cot \zeta_2 + h_1 \cot \zeta_1 + h_1 \cot \zeta'_1 + h_2 \cot \zeta'_2 + \left(h_3 + \frac{\eta}{2} - h_1 - h_2 \right) \cot \zeta'_3$$

載滿貨品的驢子

阿拉丁神燈

回錨碇式鋼板樁碼頭 回港灣設施設計